

Mécanique et thermique des aimants pour champs magnétiques intenses

F. DEBRAY, J. DUMAS, C. TROPHIME, N. VIDAL, JP FRANC*

*Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses UPR 3228 LNCMI-CNRS-UJF-UPS-INSA
25 rue des martyrs 38042 Grenoble France.*

** Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels UMR 5519 LEGI-CNRS-UJF, Grenoble-INP
1025 Rue de la piscine, BP 53, 38041 GRENOBLE France*

Résumé :

Les aimants pour champs magnétiques intenses permettent de produire des champs magnétiques continus jusqu'à 45 T, bien au-delà des limites des aimants supraconducteurs à basse température (record de 23,5 T). Ils sont réalisés à partir de bobinages d'alliage de cuivre soumis à des contraintes mécaniques et thermiques extrêmes. Ces structures mécaniques travaillent à des contraintes proches de leur limite élastique et les flux de chaleur surfaciques à évacuer atteignent 500 W.cm². Nous présentons les développements en cours pour la conception et la réalisation de ces échangeurs thermiques aux caractéristiques très particulières.

Abstract :

High magnetic field magnets up to 45 T (which aim at producing magnetic fields higher than those produced by superconducting magnets, 23.5 T) are made of copper alloy windings submitted to extreme thermal and mechanical constraints. These mechanical structures are working at a level of constraints approaching the yield strength of the material and the surface heat fluxes to evacuate can reach 500 W.cm². We present undergoing developments for the conception and the construction of these heat exchangers with so peculiar characteristics.

Mots clefs: énergétique, transfert de chaleur, champs magnétiques intenses.

1 Introduction

Un siècle après la découverte de la supraconductivité, les matériaux supraconducteurs à basse température permettent aujourd'hui de construire des aimants bobinés permettant d'atteindre des champs magnétiques de 12 teslas (T) à l'aide de câbles à base de NbTi et de 20 à 23 T lorsque le Nb₃Sn est employé pour les bobinages les plus centraux. Au delà ces matériaux perdent leur propriété supraconductrice et des bobinages à base d'alliage cuivreux doivent être utilisés. 35 T sont alors obtenus à l'aide de bobinages cuivre ou 45 T lorsque la combinaison d'un aimant supraconducteur externe avec un aimant résistif interne (aimant dit « hybride ») est utilisée. La production de ces champs magnétiques extrêmes nécessite donc des installations de puissance électrique conséquentes. Au niveau mondial, quatre laboratoires possèdent les installations de puissance électrique et de refroidissement permettant la mise à disposition de tels aimants, ces installations étant ouvertes à la communauté internationale par le biais de comités de sélection. Il s'agit du NHMFL, site de Tallahassee (Floride), du LNCMI site de Grenoble, du HMFL à Nijmegen (Pays Bas) et du TML à Tsukuba (Japon). De nouvelles installations sont en cours de développement en Chine sur le site de Hefei. Les aimants résistifs développés dans ces instituts ont des puissances électriques variant de 10 à 30 MW et nécessitent un refroidissement continu à l'eau déminéralisée avec des débits pouvant atteindre 300 litres par seconde. Pour atteindre des champs magnétiques plus intenses encore (de l'ordre de la centaine de teslas pendant quelques dizaine de ms) il est possible d'utiliser des techniques de champs pulsés qui consistent à décharger des bancs de capacité sur des bobinages refroidis à l'Azote liquide qui se réchaufferont adiabatiquement pendant le « tir ». Les installations les plus importantes sont alors les sites de Los Alamos

(EU) de Dresde (Allemagne) et du LNCMI site de Toulouse. Nous ne décrivons dans ce papier que les contraintes de conception associées aux aimants pour champs intenses à fonctionnement continu.

2 Technologies des aimants pour champs intenses

Le développement des aimants pour champs intenses a été porté dès les années 60 par la physique de la matière condensée pour l'étude des propriétés des matériaux. De fait la priorité a été de donner accès à des champs magnétiques intenses dans des volumes relativement restreints. En conséquence les développements se sont portés sur des géométries cylindriques simples. La figure 1 donne le schéma typique d'un aimant résistif tel que développé aujourd'hui au LNCMI. L'aimant externe est composé d'aimant de type « Bitter ». Cette technologie qui porte le nom de son inventeur Francis Bitter du MIT Boston a été développée dès les années 1940 et est maintenant bien maîtrisée. Il s'agit essentiellement d'un empilement de feuilles d'alliage de cuivre et de feuille d'isolants de type polyimide. Une fois cet aimant comprimé le courant électrique de l'ordre de 30000 ampères circule de façon hélicoïdale dans la structure produisant un champ magnétique axial. Cette technologie, intéressante par sa simplicité (fabrication possible en série des éléments de base de la construction) rencontre des limitations dans le cas de développements d'aimants de petits diamètres très contraints. Il s'agit essentiellement d'une continuité électrique imparfaite car obtenue par un pré-serrage réalisé par des tirants traversant les disques et de l'augmentation de la densité des trous ou fentes de refroidissement vers les petits diamètres conduisant à une fragilisation de la structure

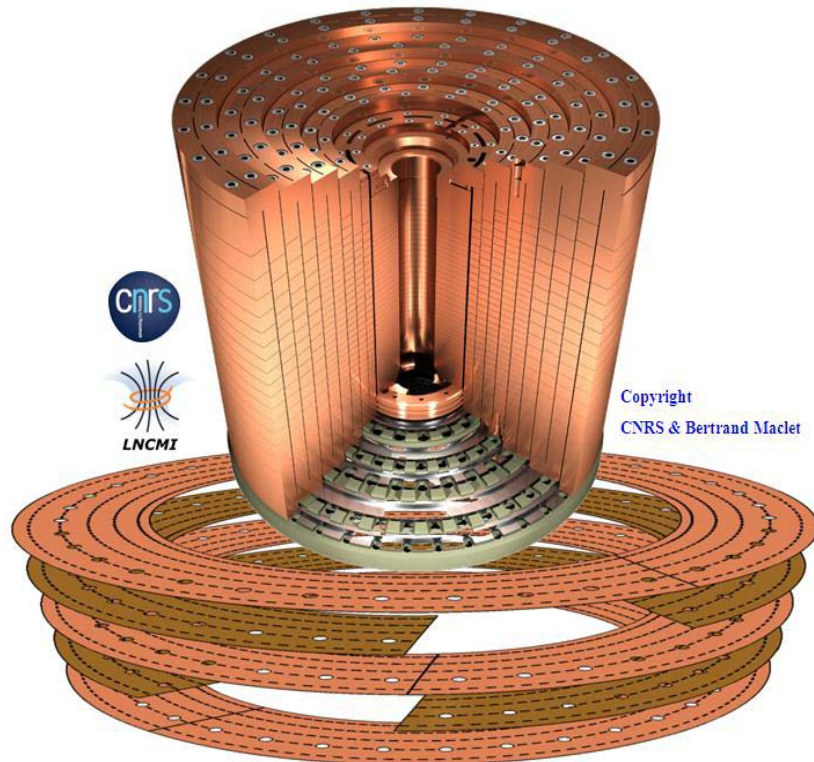


FIG. 1 – Schéma de principe d'un aimants pour champs intenses. En ce qui concerne la partie « Bitter » externe (le diamètre externe peut atteindre 1000 mm) seuls trois disques de cuivre et deux secteurs de feuilles isolantes ont été représentés pour aider à la compréhension. Pour l'aimant interne l'ensemble des tubes découpés en hélice formant l'aimant polyhélice est représenté. Un tube central en fibre de verre (non représenté) réalise ensuite l'interface entre l'aimant refroidi à l'eau (convection forcée dans des mini-canaux avec des vitesses de l'ordre de 25 à 40 m.s⁻¹), et l'espace disponible pour le chercheur. Au centre de l'aimant, 35 T sont atteints pour un trou de champ à température ambiante de 34 mm. En utilisant seulement les tubes les plus externes on peut obtenir des champs de l'ordre de 20 T dans des diamètres proches de 200 mm.

mécanique et à une baisse du facteur de remplissage préjudiciable à l'efficacité de l'aimant pour une puissance électrique donnée. Pour ces raisons le LNCMI développe pour ces bobinages les plus contraints des aimants de types polyhélices. Il s'agit d'un ensemble de tubes d'alliage de cuivre qui ont été au préalable

découpé par électroérosion au fil, les tubes les plus externes ayant un diamètre de 400 mm. Une opération d'imprégnation (mélange de colle et de bille de verre) est ensuite réalisée pour isoler les spires les unes des autres. L'usinage de finition est ensuite réalisé.

3 Processus d'optimisation

Nous présentons succinctement le processus d'optimisation dont on trouve une description détaillée dans [1]. Les données d'entrée sont la puissance électrique disponible (12 MW au LNCMI pour un aimant polyhélice), le courant électrique maximum disponible (31000 A) ainsi que la géométrie globale de l'aimant qui résulte essentiellement de la disponibilité des matériaux de forge nécessaires pour la réalisation des ces aimants. Pour des aimants axisymétriques de géométrie simple, on peut calculer analytiquement la valeur du champ magnétique en tout point de l'espace à partir de la loi de Biot-Savart. On optimise ainsi la distribution de courant dans un système d'aimants axisymétrique pour atteindre un champ magnétique maximum au centre avec des contraintes qui sont la puissance électrique maximale disponible d'une part et des critères heuristiques d'autre part (température de fonctionnement et contrainte mécanique maximale autorisées sur chaque hélice). La puissance joule dissipée dans chaque hélice est évacuée par convection forcée d'eau déminéralisée circulant dans l'espace annulaire entre deux hélices consécutives. Les ordres de grandeurs sont : largeur du canal hydraulique de 500 à 900 μm et vitesse de 30 m.s^{-1} . Dans ces conditions les coefficients de transferts de chaleur à la paroi sont de l'ordre de : $h = 10^5 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$.

4 Aspects énergétiques et thermohydrauliques

La puissance totale de 12 MW d'un aimant de 14 hélices est évacuée par un débit de l'ordre de 150 l.s^{-1} . Cette valeur de débit permet de limiter la différence de température entrée-sortie de l'eau de refroidissement à 20°C et d'éviter des problèmes de cavitation en sortie de canaux. L'optimisation de l'efficacité du refroidissement est un paramètre crucial pour l'optimisation des aimants pour champs intenses. Ainsi l'obtention d'un gain de 3°C de température moyenne sur l'aimant en alliage de cuivre permet à champ constant de baisser de 1% la consommation électrique (soit 120 KW en moins).

Le flux thermique typique à la paroi des tubes-hélices est de l'ordre de 300 à 500 W.cm^{-2} et le nombre de Reynolds caractérisant l'écoulement annulaire entre deux hélices est de l'ordre de 10^4 . Le gradient de température dans la couche limite près de la paroi des hélices est quant à lui de l'ordre de 50°C. Ces valeurs extrêmes ont conduit à s'interroger sur la validité des corrélations classiques utilisées pour le calcul des coefficients de transferts à la paroi. Un programme expérimental a été ainsi développé avec le Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels (LEGI) pour simuler le comportement thermo-hydraulique de canaux plans de 0,3 à 1 mm d'épaisseur modélisant les canaux annulaires présents dans les aimants pour champs intenses. On trouvera dans [2] une synthèse de ces travaux. Ces travaux concluent à la validité des corrélations classiques de type Colburn pour l'estimation des coefficients h pour des tailles de canaux de 0,3 à 1 mm. Cependant, à cause de contraintes de pression maximale admissible sur la première version de la boucle hydraulique, la gamme des vitesses supérieures à 20 m.s^{-1} n'a pu être abordée. Un nouveau programme d'étude de ces écoulements est en cours avec le LEGI qui utilise une boucle hydraulique de 40 bars (contre 13 bars sur l'ancienne) (figure2).



FIG. 2 – Vue de la boucle hydraulique 40 bar, 20 l.s^{-1} . La pressurisation avale est réglable permettant des études de seuils de cavitation. Cette boucle permet soit de tester hydrauliquement les hélices les plus internes des aimants pour champs intenses, soit d'étudier la thermohydraulique dans un mini-canal plan pour la modélisation des régimes extrêmes.

La géométrie des écoulements rencontrés dans les aimants pour champs intenses peut être complexe. Ainsi pour les hélices les plus internes le LNCMI développe actuellement l'utilisation d'hélices à refroidissement radial. Dans ce cas le refroidissement ne s'effectue plus longitudinalement mais entre les spires dans la direction radiale. Pour cela on introduit entre les spires de l'hélice des tuiles isolantes de 150 à 250 μm qui définissent l'épaisseur des canaux. La longueur du canal correspond alors à l'épaisseur de l'hélice qui est de l'ordre de 20 mm. On est en présence de canaux courts dans lesquels les effets d'entrée hydraulique et thermique sont importants. La figure 3 montre une photographie de la sortie des canaux d'une hélice à refroidissement radial.

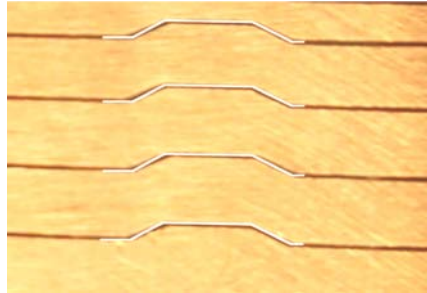


FIG. 3 – Sortie des canaux sur une hélice à refroidissement radial (échelle $\sim 2:1$). L'axe magnétique est vertical sur cette image. Le courant circulant dans les spires est de 30 000 A pour une section de l'ordre du cm^2 . L'écoulement principal est perpendiculaire au plan de la feuille.

La forme de la découpe a une double fonction : reprendre les efforts électromagnétiques de torsion de l'hélice liés à l'interaction de la composante longitudinale du courant avec la composante radiale du champ magnétique et éviter l'expulsion des tuiles par la pression hydraulique [3]. L'écoulement principal est radial (sortant du plan de la figure), mais évacué latéralement ce qui conduit à un gradient de vitesses suivant l'axe longitudinal qui provoque une distribution inhomogène des débits dans l'ensemble des fentes. La quantification de ces effets est en cours sur la boucle d'essai présentée à la figure 2.

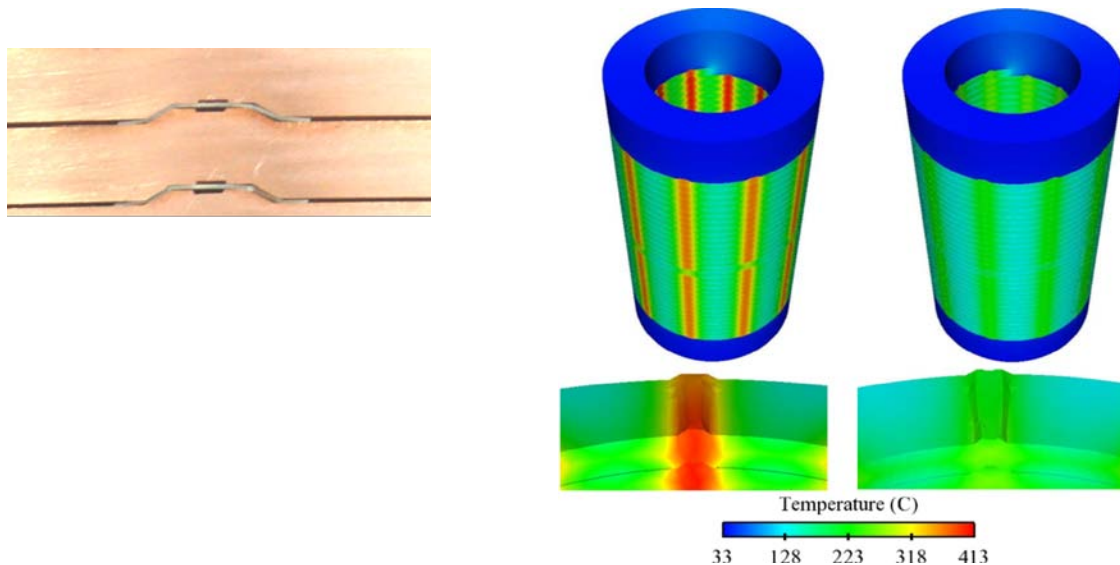


FIG. 4 – Découpe intégrant la réalisation de microcanaux additionnels (photo à droite) et gain obtenu sur les températures locales entre la solution sans et avec microcanaux (à gauche). L'épaisseur de l'isolant est de 200 μm .

Par ailleurs afin de diminuer l'élévation de température locale liée à la mise en place de l'isolant (le point faible du refroidissement radial), nous avons développé une découpe particulière par électro-érosion permettant de créer des microcanaux supplémentaires au centre de chaque bosse. La figure 4 donne un aperçu de cette géométrie de découpe et des gains de température obtenus. Cette technologie est depuis fin 2010 appliquée sur les aimants pour champs intenses utilisant la technique du refroidissement radial et conduit à un gain de 5% de puissance électrique sur les éléments concernés par un abaissement de la température moyenne de l'hélice de l'ordre de 15 $^{\circ}\text{C}$.

5 Contraintes Matériau

La figure 5 montre la distribution des efforts dans une hélice à refroidissement radial lors d'un fonctionnement à haut champ. Avec les limitations thermiques, les limitations matériaux constituent le deuxième verrou pour le développement des aimants pour champs magnétiques intenses. Le type de matériaux utilisés (alliages à durcissement structural) permet un «réglage» des propriétés mécaniques et thermiques en fonction du cahier des charges. Ainsi pour un même matériau (exemple du CuCrZr le plus couramment utilisé) on pourra obtenir une limite élastique variable de 350 à 450 MPa pour des conductivités électriques allant de 52 à 48 MS (100% IACS correspondant à 58 MS). Notons que ce type d'alliage est utilisé pour un autre type d'application où le compromis propriétés mécaniques/conductivité thermique est crucial : la fabrication des tuyères d'Ariane [4].

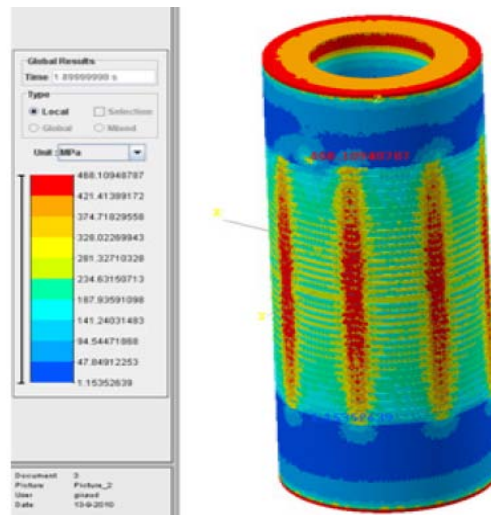


FIG. 5 – Distribution des efforts mécaniques sur une hélice radiale. Les contraintes (de Von Mises) atteignent dans ce cas de calcul 468 MPa. Ainsi pour la fabrication de ces hélices pour champs magnétiques intenses des alliages de cuivre à haute propriétés mécaniques et conductivité électrique sont utilisés. Il s'agit principalement d'alliages à durcissement structural : CuZr, CuCrZr, ou CuNiBe obtenus par procédés de forge.

6 Développements

Le processus décrit précédemment concerne des géométries d'aimants solénoïdaux simples. Le LNCMI développe d'autres géométries pour les besoins d'autres instituts de recherches. La géométrie la plus demandée est celle des aimants «splittés» (c'est-à-dire possédant des accès au plan médian). Contrairement à la géométrie solénoïdale, les forces de compression (dans le cas d'une configuration correspondant à l'addition du champ magnétique des deux demi-aimants [5]) ou les forces de répulsion (configuration dite « cusp » pour la réalisation de sources d'ions par résonance) ne sont pas reprises par la bobine elle-même mais par la caisse en acier amagnétique contenant cette structure. La figure 6 montre une coupe d'un projet en cours avec le Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie (LPSC) à Grenoble pour la réalisation d'une source d'ions 60 GHz utilisant les technologies d'aimants pour champs intenses dont on trouvera la description détaillée dans [6]. La structure magnétique est composée de deux demi-aimants refroidis radialement composés chacun de deux hélices à refroidissement radial connectées électriquement en série. Le choix du refroidissement radial pour ces développements permet l'obtention de gradients de la densité de courant le long de l'axe principal de l'hélice par le biais d'une découpe à pas variable. La configuration magnétique finale obtenue permet d'obtenir une ligne fermée iso B supérieur à 2T pour confiner le plasma dans la zone centrale. Cet aimant a été testé avec succès à mi-champ fin 2010 en le connectant sur l'installation de puissance du LNCMI et les essais à plein champ sont prévus pour 2012. Ces structures sont très contraintes thermiquement à cause de l'espace restreint réservé aux parties actives de l'aimant. Les estimations de température moyenne de fonctionnement sont obtenues actuellement exclusivement par le biais de mesures de tensions électriques aux bornes de chaque hélice. Un axe prioritaire

de développement pour profiter des avancées obtenues en simulation numérique est l'instrumentation pour mesurer localement les débits, pressions, températures et contraintes mécaniques.

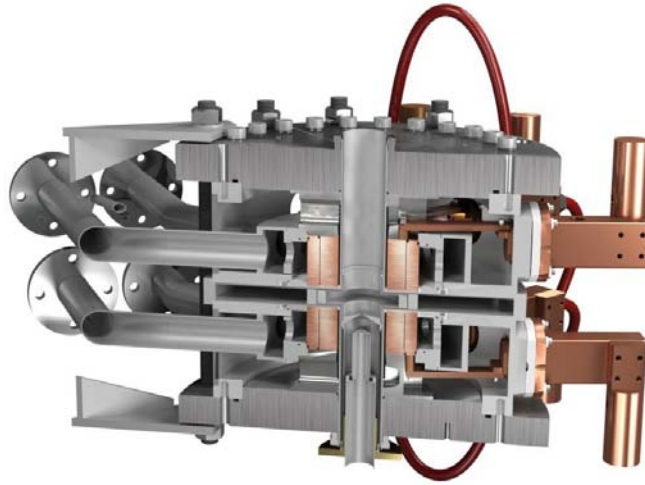


FIG. 6 – Prototype de Source d'Ions par Résonance Cyclotronique Electronique (SIRCE) à 60 GHz utilisant les technologies pour champs magnétiques intenses (taille caractéristique de 1 mètre) . On distingue les 2 groupes de 2 hélices radiales. La configuration magnétique est « soustractive » permettant d'obtenir une zone de champ fermée dans le plan médian permettant la stabilité d'un plasma.

En conclusion, les développements des aimants pour champs magnétiques reposent d'une part sur le développement de l'utilisation de nouveau matériaux supraconducteurs à haute température et d'autre part sur l'optimisation des parties résistives que nous venons de présenter brièvement qui s'appuie sur une recherche technologique dans les domaines des transferts de chaleur à haute intensité et des matériaux à haute conductivité électrique.

Nous remercions spécialement Jacques Matera et Michel Riondet pour leur soutien technique qui a accompagné de façon décisive l'ensemble de ces développements.

Références

- [1] C. Trophime, K. Egorov, F. Debray, W. Joss and G. Aubert, Magnet calculations at the Grenoble High Magnetic Field Laboratory, IEEE Transactions on Applied Superconductivity 12, 1, 1483-1487, 2002
- [2] S. Reynaud, F. Debray, JP Franc, T. Maitre, Hydrodynamics and heat transfer in two-dimensional minichannels, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 48, n° 15, 3197-3211, July 2005
- [3] Brevet : dépôt français Nov 2007n°: PCT/EP2008/064338075 Bobine apte à générer un champ magnétique et procédé de fabrication de la dite bobine, CNRS Patent, WO 2009/053420 A1: Coil capable of generating Magnetic field and method of manufacturing said coil, Intern. Publication Date : 30 April 2009
- [4] L. Thomas, D. Cornu, M. Choulant, C. Verdy, C. Coddet, "Vacuum Plasma Spray Process applied to high thickness components for Liquid Rocket Engine", AIAA paper 2005-3573, 41th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit
- [5] F. Debray, J. Dumas, S. Labbé-Lavigne, R. Pfister, C. Trophime, N. Vidal, F. Wilhelm, M. Enderle, Design study of High Field Resistive Magnets for Diffraction Experiments, , IEEE Trans. on Appl. Superconduc. 20 (2010).
- [6] L. Latrasse, M. Marie-Jeanne, T. Lamy, T. Thuillier, J. Giraud, C. Fourel, C. Trophime, F. Debray, P. Sala, J. Dumas "SEISM : a 60GHz cusp electron cyclotron resonance ion source. The 13th International Conference on Ion Sources (ICIS'09), US (2009), Rev. Sci. Instrum. 81, 02B314 (2010).